

基于变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术的 三维建模研究

丁道军¹, 夏睿¹, 翁惠廉², 王振², 粟志元³

(1、国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000; 2、国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 江苏 扬州 225000; 3、北京博超时代软件有限公司, 北京 100010)

Research on 3D Modeling based on ICAD Technology of Intelligent Auxiliary Control System

Ding Daojun, Xia Rui, Weng Huilian, Wang Zhen, Su Zhiyuan

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Yangzhou Power Supply Branch, Yangzhou 225000, China; 3. Beijing Bochao Times Software Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: In order to improve the capability of remote monitoring and intelligent prevention and control of the running environment and public safety of intelligent substation equipment, A three-dimensional modeling method based on ICAD technology of substation intelligent assistant control system is proposed. According to the requirement of equipment selection and layout of intelligent auxiliary control system, the database is developed and designed, and the classified information, key parameters and 3D model information of substation intelligent auxiliary control equipment are unified and managed. The function area identification information, secondary screen cabinet location and other information in the 3D model of substation are checked and processed by 3D design model. Three-dimensional intelligent computer-aided design technology is used to realize the remote 3D visualization operation and maintenance of substation intelligent assistant control system project, multi-specialty cooperation and sharing of 3D design results. The 3D design model checking algorithm of substation intelligent assistant control system (ICAD) is designed, and the 3D modeling optimization is carried out. The simulation results show that this method is better for 3D modeling of substation intelligent assistant control system (ICAD), and the accuracy of 3D modeling is higher, and the performance of 3D monitoring for substation equipment is improved.

Keywords: Substation; Intelligent assistant control system; ICAD technology; 3D modeling

摘要: 为了提高智能变电站设备运行环境与公共安全状态的远程监测及智能化防控能力, 提出一种基于变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术的三维建模方法。按照智能辅助控制系统的设备选型布置需求进行数据库开发设计, 将变电站智能辅助控制设备分类信息、关键参数和设备三维模型信息入库统一管理, 对变电站三维模型中的功能区域标识信息、二次屏柜位置等信息进行三维设计模型校验处理, 采用三维智能计算机辅助设计技术实现变电站智能辅助控制系统项目的远程三维可视化运维、多专业协同以及三维设计成果的共享, 实现变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维设计模型校验算法设计, 进行三维建模优化。仿真结果表明, 采用该方法进行变电站智能辅助控制系统 ICAD 三维建模的视角定位性能较好, 三维建模的准确度较高, 使变电站设备的三维监控性能得到提升。

关键词: 变电站; 智能辅助控制系统; ICAD 技术; 三维建模

0 引言

随着国家电网公司智能电网规模的逐年扩大, 各区域智能变电站协调管控、防自然灾害、防外力破坏的难度将日益增大。因此智能辅助控制系统建设技术的发展应当紧紧围绕强化本质安全的核心目标, 同时遵循变电站全寿命周期管理理念。通过加快研究更为科学、先进的智能辅助控制系统模块化建设技术, 以不断提高智能变电站设备运行环境与公共安全状态的远程监测及智能化防控能力^[1]。当下, 如何进

一步深刻理解“大运行、大检修”模式对智能辅助控制系统的功能建设需求，是当今需要重点攻关的课题。

三维 ICAD 平台厘清了智能辅助控制系统中场景控制策略、设备参数选择要求、设备配置数量要求、设备布置原则四个关键设计输入元素之间较为复杂的交集关系，实现了智能辅助控制系统的智能化精准设计^[2,3]。在前端设备效能仿真、二维图纸自动生成、设备布置和线缆敷设设计方面，应用三维 ICAD 平台进行设计的质量与效率达到传统 CAD 设计难以企及的高度，解决了二维设计无法进行设备三维精准布置和线缆敷设路径的技术难题，同时应用三维 ICAD 平台生成的智能辅助控制系统三维模型可供主站端辅助设施监控平台共享。ICAD 平台的三维设计功能、建模标准、工作流程、协调管控措施的完成，可实现远程三维可视化运维、多专业协同以及三维设计成果的共享和应用，进一步提升电力公司相关单位智能化设计、施工和运维水平，大幅提高劳动生产效率、产品质量和工程全寿命周期服务功能。因此，研究变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术和三维建模方法具有重要意义，传统方法中，对变电站智能辅助控制系统的三维建模方法主要有 LOD 渲染方法、静态视景监测方法、三维模型校验方法等，进行了智能辅助控制系统三维 ICAD 系统的三维监测，避免由于变电站三维模型问题影响智能辅助控制系统 ICAD 平台前端设备自动选型布置，取得了一定的研究成果，其中，文献[4]中提出一种基于多维网格空间重构的变电站智能辅助控制系统三维建模方法，利用参数化图形驱动技术动态模拟红外线探测，实现变电站智能辅助控制和 ICAD 设计，扩大对设备监测范围，但该方法对变电站智能辅助控制的鲁棒性不好，抗干扰能力不强；文献[5]中提出一种基于红外对射和或外双鉴的变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术三维建模方法，满足智能辅助控制需求，但该三维建模方法的时间开销较大，人机交互性不好；文献[6]中提出一种基于二次逻辑控制的变电站智能辅助控制系统 ICAD 三维建模方法，根据变电站前端设备的布置信息及屏柜三维模型信息

进行三维建模，但该方法进行三维建模的结构化储存性能不好。

针对上述问题，本文提出一种基于变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术的三维建模方法。首先进行变电站智能辅助控制设备三维建模的数据库设计，进行了智能辅助控制系统三维 ICAD 系统总体构架、专家策略库、典型设备库设计，采用三维智能计算机辅助设计技术实现变电站智能辅助控制系统项目的远程三维可视化运维处理，实现变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维设计模型校验，最后进行仿真实验分析，展示了本文方法在提高变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维监控能力方面的优越性能。

1 系统总体构架及数据库架构

1.1 智能辅助控制系统的总体构架

智能辅助控制系统 ICAD（智能计算机辅助设计）以 SQLServer 数据库作为数据管理引擎，采用 Revit 软件管理三维数字化模型，AutoCAD 管理设计图纸资料。在数据库和图形引擎基础上，构建工程数据管理平台，包括工程设备库、业务数据库和三维模型库、图纸文件资料库等数据服务模块，为应用功能提供数据服务^[7]。

资源管理层包括典型设备库、专家策略库，存储前端设备的选型规则、布置算法、场景化智能辅助联动控制策略，是 ICAD 平台核心规则的数据服务模块。ICAD 平台的应用功能层包括三维设计模型校验、前端设备自动选型布置、前端设备效能仿真校验、二次回路辅助设计、线缆敷设设计五个功能模块；通过工程数据库实现业务数据的共享；完成变电站前端设备的自动选型布置、效能仿真校验，二次回路辅助设计及线缆敷设设计。

输出层完成智能辅助控制系统的三维数字化模型、全套施工图、效能仿真报告及设备材料清册等设计成果的输出。智能辅助控制系统 ICAD（智能计算机辅助设计）平台导入变电站三维设计模型，调用模型校验规则对变电站三维模型进行校验。通过校验后，进行功能区域识别和功能区域场景配置，调用专家策略库、

典型设备库，按照功能区域进行智能辅助控制系统的子系统配置，依据专家策略库中的自动选型规则和布置算法对智能辅助控制系统的子系统进行前端设备自动选型和布置，并对前端设备编码^[8]。

前端设备选型布置完成后，对主动型前端设备进行效能仿真校验，验证主动型前端设备选型布置的合理性，优化前端设备布置。效能仿真校验通过后，进行前端设备的信息配置，补充前端设备的厂家名称、运行参数、设备型

号等信息。在屏柜三维模型和前端设备三维模型基础上，实现屏柜、功能单元及前端设备的逻辑连接关系配置，完成二次回路辅助设计，二次回路逻辑连接关系保存到业务数据库。线缆敷设设计模块根据二次回路逻辑连接关系和线缆主通道三维模型，实现线缆自动敷设，生成线缆清册，数据保存到业务数据库。最后 ICAD 平台输出三维数字化模型、全套施工图、效能仿真报告及设备材料清册等设计成果，得到系统的构架图如图 1 所示。



图 1 系统构架图

ICAD 平台的应用功能层包括三维设计模型校验、前端设备自动选型布置、前端设备效能仿真校验、二次回路辅助设计、线缆敷设设计五个功能模块；通过工程数据库实现业务数据的共享；完成变电站前端设备的自动选型布置、效能仿真校验，二次回路辅助设计及线缆敷设设计，系统的软件构架图如图 2 所示。

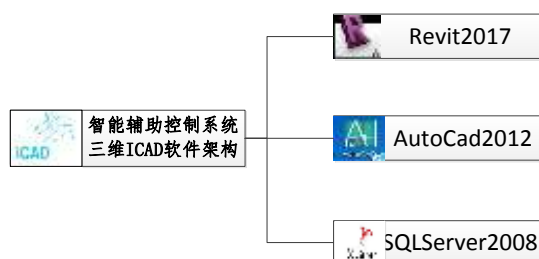


图 2 系统软件构架图

1.2 数据库架构

智能辅助控制系统 ICAD（智能计算机辅助设计）在数据库引擎基础上，构建资源管理模块和工程数据管理平台，其中资源管理模块包括典型设备库和专家策略库；工程数据管理平台依托于工程数据库，包括工程设备库、业务数据库、三维模型库及图纸文件资料库等四部分，为应用功能提供数据服务^[9]。数据库架构图如图 3 所示。

2 变电站智能辅助控制信息处理

2.1 三维设计模型校验

为了实现对变电站智能辅助控制系统 ICAD 技术的三维建模，采用模型数据校验方法检查变电站智能辅助设计系统所需要模型的参数信息^[10]，变电站智能辅助控制的测度距离为：

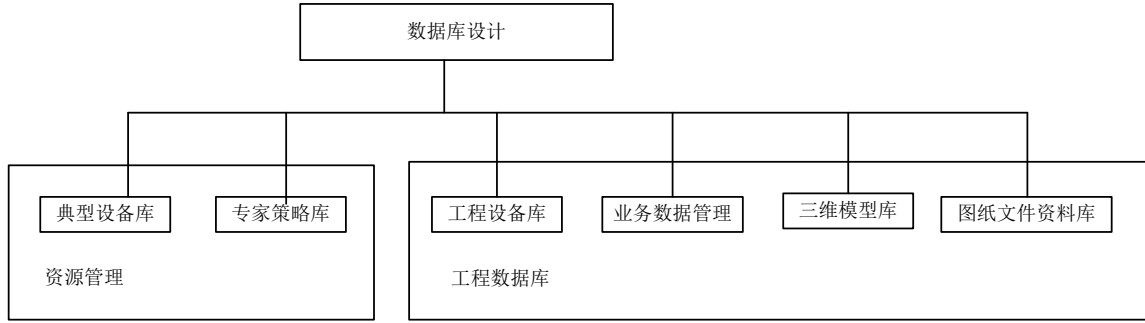


图3 数据库架构图

$$\|r\| = \sqrt{\sum_{i=0}^m r_i^2 \|v_{\sigma(i)}^*\|^2 + \|w\|^2} \geq |r_m| \|v_{\sigma(m)}^*\| \quad (1)$$

根据模型定义规则开发校验工具，自动校验所选设备的模型属性信息表示为：

$$SL_i = \begin{cases} L_i & \text{if } i = 1 \\ New_i' & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $New_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iD})$ ，表示每个场景匹配的变电站配电节点集合，对应每个场景匹配的前端设备，得到设备选型布置的三维迭代方程为：

$$f_{ij}(n+1) = f_{ij}(n) + \mu_{MCMA} \frac{\partial J_{MCMA}(n)}{\partial f_{ij}(n)} \quad (3)$$

其中， μ_{MCMA} 代表前端设备自动选型的红外双鉴特征量，根据 ICAD 的相关性关系，得到红外对射光束的三维建模抽样判决函数

$$f_{ij}(n) = [f_{ij}^{(0)}(n), f_{ij}^{(1)}(n), \dots, f_{ij}^{(L-1)}(n)]^T$$

对不同的信道的变电站控制输出信号进行相干性检测，结合碰撞检查和光束辐射的动态模拟方法，得到均衡控制方程：

$$\frac{\partial J_{MCMA}(n)}{\partial f_{ij}(n)} = \frac{1}{4} \left(\sum_{j=1}^M \frac{\partial J_{R,j}(n)}{\partial f_{ij}(n)} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial J_{I,j}(n)}{\partial f_{ij}(n)} \right) \quad (4)$$

读取摄像机光束的辐射基点^[11]，得到变电站智能辅助控制的多普勒频谱描述为：

$$e_{R,j} = (y_{R,j}(n))^2 - R_{2,R} \times y_{R,j}(n)^* \quad (5)$$

采用红外像素特征重构方法，进行三维视觉建模，创建出监控范围的三维视图，输出的三维视觉特征信息为：

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^M h_{ij}(n)^T s_j(n) + v_i(n) \quad (6)$$

以摄像机的最大视角为三维建模的视觉信息采样点，根据参数创建监控范围的可见化三维模型。

2.2 红外双鉴三维建模

智能辅助控制系统 ICAD 采用红外双鉴三维视觉成像方法进行变电站的监控识别，变电站智能辅助控制系统 ICAD 场景信息为：

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^P f_{ij}(n)^T x_i(n) \quad (7)$$

其中， h_{ij} 代表单位冲激响应函数， f_{ij} 表示

三维建模的采样频率。根据图像像素级视差函数进行三维建模，得到图像序列在视线方向的三维特征量表示为：

$$\begin{aligned} R_w(l) &= E[w(k)w^H(k+l)] \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \left[\delta_l \cdot \frac{1}{\Delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\Delta^2}} \right] a(\theta)a^H(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

式中， θ_0 和 Δ 两个参数分别表重构的三维数据场，计算局部灰度信息为：

$$\text{Var}(T_a) = (B\sigma_a^2)^2 \left(\begin{aligned} & \left(\frac{B(l-2n,m)}{(c_a^{\max})^{2n}} B(l,m) \left(\exp(2n\mu_a^2 + (2n\sigma_a^2)/2) \right) \right) \\ & - \left(\frac{B(l-n,m)}{(c_a^{\max})^n} B(l,m) \left(\exp(n\mu_a^2 + (n\sigma_a^2)/2) \right) \right)^2 \end{aligned} \right) \quad (9)$$

三维建模的 3D Texttrue 和 3D Array 坐标分布式为：

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, v) dt = |X(v)|^2 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, v) dv = |x(t)|^2 \end{cases} \quad (10)$$

上式中, $|X(v)|$ 表示固定模板中的射线模
值, 结合频谱特征提取, 得到变电站智能辅助
控制系统各功能区域的三维建模输出为:

$$t_a = E(T_a) = t_a^0 + \beta t_a^0 E((V_a)^n) E(1/(C_a)^n), \quad a \in A \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E((T_a)^2) &= (t_a^0)^2 + 2\beta(t_a^0)^2 E((V_a)^n) E(1/(C_a)^n) \\ &+ (\beta t_a^0)^2 E((V_a)^{2n}) E(1/(C_a)^{2n}), a \in A \end{aligned} \quad (12)$$

$$\varepsilon_a^2 = \text{Var}(T_a) = E((T_a)^2) - (E(T_a))^2, \quad a \in A \quad (13)$$

采用相干关联检测方法进行电站三维模型
中的功能区域标识信息检测, 结合数据融合和
三维图像识别方法, 进行变电站智能辅助控制
系统 ICAD 的三维设计^[12]。

3 ICAD 三维建模的算法优化

3.1 三维可视化运维

采用三维智能计算机辅助设计技术实现变
电站智能辅助控制系统项目的远程三维可视化
运维处理, 得到变电站负载均衡配置的平均互
信息量分别为:

$$q^w = E(Q^w) = \sum_{k \in R_w} f_k^w, w \in W \quad (14)$$

$$v_a = E(V_a) = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_w} \delta_{ak}^w f_k^w, a \in A \quad (15)$$

$$f_k^w \geq 0, k \in R_w, w \in W \quad (16)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示智能辅助控制系统的三维
建模量化分析函数, 对变电站三维模型中的功
能区域标识信息、二次屏柜位置等信息进行融
合处理^[13], 得到输出特征子序列分别表示为:

$$r_1(n) = r_2(n) \exp(-j\omega_0 T_p / 2), n = 0, 1, \dots, (N-3)/2 \quad (17)$$

$$r_2(n) = A \exp[j(\omega_0 n T + \theta)], n = 0, 1, \dots, (N-3)/2 \quad (18)$$

分别对设备运行参数、设备型号、设备关

联特征量 $r_1(n)$ 和 $r_2(n)$ 进行 $(N-1)/2$ 点盲源分离,
得到变电站的三维建模输出负载量:

$$R_1(k) = R_2(k) \exp(-j\omega_0 T_p / 2), k = 0, 1, \dots, (N-3)/2 \quad (19)$$

$$R_2(k) = A_k \exp(j\varphi_k), k = 0, 1, \dots, (N-3)/2 \quad (20)$$

其中, ω_0 为设备运行参数属性信息, T_p 为
时间窗口, A_k 为工程数据库的设备分类目录的
偏移幅值, φ_k 为输出扩展相位。

3.2 智能辅助控制系统 ICAD 三维建模输出

通过管理界面, 对设备厂商、设备型号、
设备运行参进行扩充和编辑, 设计过程数据的
数字化流转, 满足数据可读性和共享性的需求,
得到变电站智能辅助控制系统项目的远程三维
可视化重构输出为:

$$\begin{aligned} \text{Computation}(n_j) &= (E_{elec} + E_{DF})l\delta + E_{Tx(l,d_j)} \\ &= (E_{elec} + E_{DF})l\delta + lE_{elec} + l\varepsilon_\beta d_j^2 \\ &= [(E_{elec} + E_{DF})\delta + E_{elec} + \varepsilon_\beta d_j^2]l \end{aligned} \quad (21)$$

将线缆敷设设计信息抽象成数据模型, 在
变电站的三维存储介质 OD 上, 对 w 间路径进行
均衡调度, 得到负载 $\xi_k^w(\omega)$ 的二次屏柜信息特征
量为:

$$\eta_k^w(\omega) = E(T_k^w | T_k^w > \xi_k^w(\omega)), k \in R_w, w \in W \quad (22)$$

其中: $\xi_k^w(\omega)$ 为工程设备库设备属性, 可以

表示为:

$$\xi_k^w(\omega) = \min \{ \xi | \Pr(T_k^w \leq \xi) \geq \omega \} = E(T_k^w) + \gamma_k^w(\omega), \quad k \in R_w, w \in W \quad (23)$$

屏柜接线端口通过线缆与前端设备或功能
单元连接, 由此实现 ICAD 三维建模, 得到三
维建模输出为:

$$\begin{aligned} \Phi(\omega) &= E[e^{j\omega X}] = \\ &\begin{cases} \exp\{j\mu\omega - |\sigma\omega|^\alpha [1 - j\beta \text{sgn}(\omega) \tan(\frac{\pi\alpha}{2})]\}, \alpha \neq 1 \\ \exp\{j\mu\omega - |\sigma\omega|^\alpha [1 + j\beta \text{sgn}(\omega) \frac{2}{\pi} \ln|\omega|]\}, \alpha = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

计算第 $j = 0, 1, \dots, M$ 个采样点的负载值, 根

据三维建模结果,屏柜接线端口通过线缆与前端设备或功能单元连接,实现前端设备的通信与控制。根据参数,创建监控范围的可见化三维模型,如图4所示。

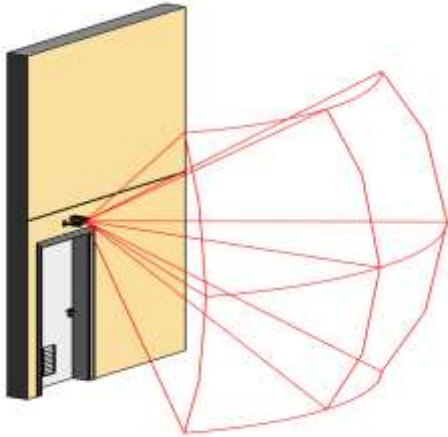


图4 监控范围的可见化三维模型

4 智能辅助控制系统 ICAD 平台的系统集成

按照智能变电站的现行规程规范,结合现有工程的设计资料,对前端设备的安装、接线、控制方式进行了详细分析;整理了屏柜、功能单元、前端设备的逻辑关系,结构化数据格式,存储格式,接线规则,编号规则等资料。首先进行数据库构建,主要包括如下几个方面:

(1) 建立典型设备库

根据需求调研资料中前端设备的分类和关键参数要求,建立典型设备库,并将5个子系统的51类前端设备入库,对设备分类、关键参数和设备三维模型统一管理,为智能辅助控制系统进行自动设备选型布置提供典型数据。

(2) 建立专家策略库

基于现有智能辅助控制系统规范,结合智能辅助控制系统的现有工程设计实例,得出变电站智能辅助控制系统的场景信息、联动策略、前端设备配置规则及前端设备布置规则。

(3) 建立工程数据库

参照设备厂家提供的设备运行参数、设备型号、设备关联的文件资料等数据,建立工程设备库的设备目录表、51个设备属性表及三维模型表;根据对前端设备、二次屏柜、功能单

元、屏柜接线端口之间逻辑接线关系的分析结果,建立业务数据库,为实现二次回路辅助设计数据的数字化流转提供数据服务;分析智能辅助控制系统包含的图纸文件类型及文件目录,建立图纸文件资料库的文件目录表和文件实例表,实现非结构化文件的存储。

依据智能辅助控制系统 ICAD 平台总体设计方案,以 SQL server 数据库、Revit 软件平台、AutoCAD 软件作为数据引擎,在典型设备库、专家策略库和工程数据库三个核心数据管理模块基础上,构建 ICAD 平台应用功能的集成环境,完成智能辅助控制系统 ICAD 平台框架搭建,为 ICAD 平台应用功能的实现和集成提供底层技术基础和数据服务。综上分析,得到智能辅助控制系统 ICAD 平台的系统集成设计流程如图5所示。

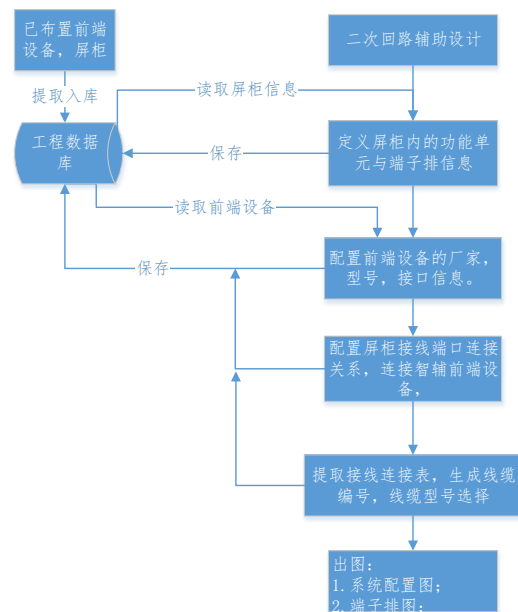


图5 智能辅助控制系统 ICAD 平台的系统集成设计流程

5 仿真实验分析

为了测试本文方法在实现智能辅助控制系统 ICAD 平台三维建模中的性能,进行仿真实验,读取设备参数库中红外双鉴的“探测距离”、“水平探测角度”、“垂直探测角度”等信息;读取红外双鉴光束的射出基点和方向信息。根据智能辅助控制系统的设计需要,在工程中已经布置的屏柜中添加指定类型的功能单元,配置功能单元设备的厂家,型号,功能接口,及接

口类型等信息，屏柜及功能单元信息以数据形式保存在业务数据库。实验中，依托扬州吴堡 110 千伏变电站工程，在实际工程中验证 ICAD 平台应用功能的适用性和易用性，运用高精度的监控范围模拟算法，实现对前端设备监控范围的具象模拟及监控场景的动态演练。变电站电压等级 110/10kV，远景 3 台 50MVA 主变压器，本期建设 2 台 50MVA 主变压器；110kV 出线本期 4 回(其中 2 回备用)，已达远景规模；10kV 出线远景 36 回，本期 24 回；本期配置

10kV 电容器组 4 台，远景 6 台；本期配置 10kV 接地变及消弧线圈成套装置 2 套，远景 3 套。10kV 配电装置采用户内移开式开关柜，双列布置与 10kV 开关室，根据上述仿真环进和参数设定，进行实验分析，首先进行线缆自动敷设测试，如图 6 所示。

根据图 6 的线缆敷设结果，用户通过管理界面，对设备厂商、设备型号、设备运行参进行扩充和编辑。工程设备库的维护界面如图 7 所示。



图 6 线缆自动敷设

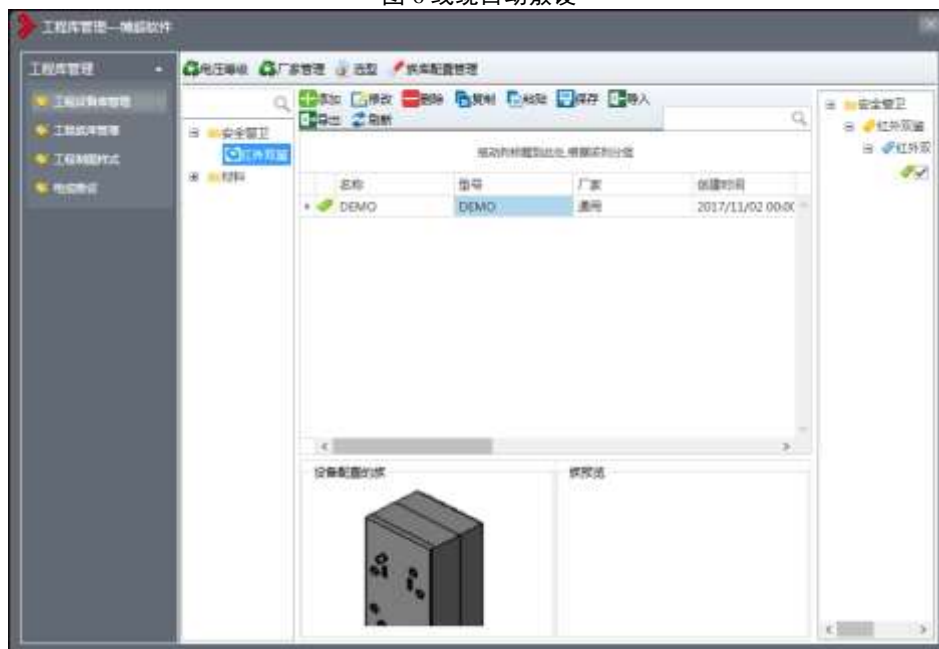


图 7 工程设备库的维护界面

为实现设计过程数据的数字化流转，满足数据可读性和共享性的需求，将设备布置信息、二次逻辑设计信息及线缆敷设设计信息抽象成数据模型，在此基础上，测试变电站的输出功率，结果如图 8 所示。

分析图 8 得知，采用本文方法进行变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维建模，提高输出功率的稳定性，进一步测试本文方法进行三维建模的运维闭环管理的处理时间开销，得到测试结果如图 8 所示。

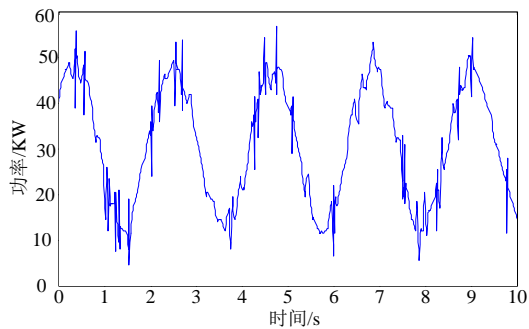


图 8 输出功率测试

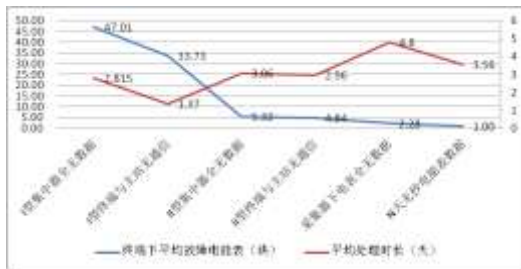


图 8 智能辅助控制系统的处理效能测试

分析图 8 得知, 采用本文方法进行变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维建模的处理效率较好, 提高了变电站的运维处理能力, 变电站设备的三维监控性能得到提升。

6 结语

本文依托于扬州吴堡变电站进行变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维建模设计, 应用智能辅助控制系统 ICAD 平台完成前端设备自动布置、仿真校验、二次回路设计和线缆敷设。根据电气一次专业、土建专业的设计图纸和智能辅助控制系统专家策略库中的模型校验规则对变电站构筑物、电气一次设备及设施进行三维建模。通过对三维设计模型的校验和修改, 使三维设计模型满足智能辅助控制系统前端设备自动选型布置的要求。其次, 智能辅助控制系统的设计人员以三维设计模型为基础, 启动专家策略, 调用典型设备, 完成前端设备在各功能区域的自动布置, 实现变电站智能辅助控制系统 ICAD 的三维设计模型校验设计和三维

建模优化。研究得知, 采用本文方法进行 ICAD 的三维建模能实时接收站端视频、环境数据、安全警卫、人员出入、火灾报警等各终端设备上传的信息, 分类存储各类信息并进行分析、判断, 实现辅助系统管理和监视控制功能, 提高变电站的智能监控和管理能力。

参考文献:

- [1] 刘倩, 谭文, 李东海. 一种多变量自抗扰控制结构的设计研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(6): 97-103.
- [2] 翁永鹏, 高究文, 刘昕明. 非仿射非线性离散系统的数据驱动二阶滑模解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3): 309-318.
- [3] Qu S, Xia X, Zhang J. Dynamical behaviours of an euler discretized sliding mode control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2014, 59(9): 2525-2529.
- [4] 高犁. 智能电网下的电力营销新型业务[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 高犁. 用电负荷管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 陈盛, 吕敏. 电力用户用电信息采集系统及其应用[J]. 供用电, 2011, 28(4): 45-49.
- [7] 尹宝才, 王文通, 王立春. 深度学习研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2015, 34(1): 48-59.
- [8] 毛长涛, 肖宗水. 智能用电大规模电能信息采集运维管理技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [9] DONG G L, RYU K S, BASHIR M, et al. Discovering medical knowledge using association rule mining in young adults with acute myocardial infarction[J]. Journal of Medical Systems, 2013, 37(2):1-10.
- [10] KHALILI A, SAMI A. SysDetect:a systematic approach to critical state determination for industrial intrusion detection systems using Apriori algorithm[J]. Journal of Process Control, 2015, 2776:154-160.
- [11] 李寿强. 基于模糊神经网络电力系统无功功率控制研究[J]. 电气应用, 2012, 31(8): 32-34.
- [12] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 32-36.
- [13] 陈旖, 许力, 张美平. 适用于大规模无线传感器网的流量优化系统设计[J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 905-909, 915.

作者简介:

丁道军(1970-), 男, 江苏南京人, 本科学历, 高级工程师, 研究方向: 电网建设、云、运检。身份证号码: 42010619700421481X。快递地址: 江苏省南京市鼓楼区上海路 215 号, 丁道军, 电话: 13705156858。邮箱: 910034389@qq.com。